

УДК 629.114.4-047.58:004.9

А.Ф. АНДРЕЙЧИК, В.И. ИВЧЕНКО, В.С. КОРОТКИЙ, В.Н. ПОЖИТОК

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

С.В. ХАРИТОНЧИК, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

А.Д. ЧОРНЫЙ, канд. физ.-мат. наук

Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

ВЛИЯНИЕ ЗАДНЕГО СПОЙЛЕРА ПОЛУПРИЦЕПА НА ОБЩЕЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЕДЕЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА

В работе рассмотрены вопросы компьютерного моделирования аэродинамических характеристик седельного автопоезда со спойлером в задней части полуприцепа. Выполнена оценка вклада заднего спойлера полуприцепа в суммарное аэродинамическое сопротивление автопоезда.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, автопоезд, спойлер, поток, обтекание, моделирование

В настоящее время рынок грузового автотранспорта требует от производителей техники создания таких моделей машин, применение которых позволит повышать эффективность перевозок. Этому препятствует ужесточение экологических норм совместно с ростом стоимости топлива, которые вынуждают автомобильные компании разрабатывать и изготавливать автотранспортные средства (АТС) с минимальным возможным расходом топлива.

Одним из факторов, которые непосредственно влияют на расход топлива автомобилей, является аэродинамическое сопротивление [1]. Согласно результатам исследований [1, 2 и др.], при увеличении скорости движения от 60 до 100 км/ч расход топлива на преодоление аэродинамического сопротивления грузового автомобиля увеличивается в 2,5...3 раза, а для автопоездов в силу особенности их конструктивного исполнения в виде вагонной компоновки потребление топлива будет еще большим. Как правило, разработчиками данная задача решается за счет придания автопоездам хорошо обтекаемых форм, а также оснащением автомобиля и прицепа специальными аэродинамическими элементами, позволяющими организовать безотрывное обтекание воздуха и существенно снизить аэродинамическое сопротивление (рисунок 1).

Особенно актуальны указанные вопросы для скоростных магистральных автопоездов. Традиционно оценка аэродинамических потерь из-за срыва потока в задней части автопоезда производилась на основе эмпирических и полуэмпирических зависимостей [1] и показала, что при движении АТС в окружающей воздушной среде происходит поджатие набегающего потока воздуха около передней части АТС с образованием зоны повышенного давления. Поток воздуха по мере движения вдоль кузова присоединяется к его поверхности. Действие сил вязкого трения вызывает нарастание динамического пограничного слоя и, в дальнейшем, при

приближении к задней стенке кузова, поток ускоряется и срывается с крыши и боковых стенок, образуя зону пониженного давления вблизи задней стенки полуприцепа и завихренный спутный след (рисунок 2) [3]. При этом, чем дальше происходит срыв, тем меньшее воздействие он оказывает на заднюю стенку полуприцепа. В кормовой части традиционно существует зона пониженного давления, куда постоянно осуществляется подсос воздуха из окружающего воздушного пространства аналогично ситуации, показанной на рисунке 2.

Классической иллюстрацией наличия зоны пониженного давления является пыль и грязь, которые оседают на элементы конструкции кормовой части АТС. За счет перепада давления воздуха между фронтальной и кормовой частями АТС создается сила лобового сопротивления. Таким образом, чем дальше будет происходить отрыв воздушного пото-



Рисунок 1 — Транспортные средства с навесными аэродинамическими элементами

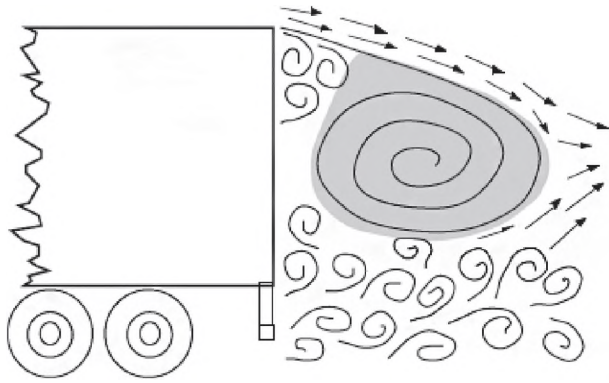


Рисунок 2 — Распределение турбулентной вязкости потока воздуха в вертикальной срединной плоскости при движении автопоезда

ка от обтекаемой поверхности и соответственно будет меньше область пониженного давления, тем меньшей будет и сила лобового сопротивления. Этому способствует геометрическая форма внешних поверхностей АТС. Она должна быть такова, чтобы процесс перемещения воздуха из зоны перед АТС в зону позади него происходил с наименьшими затратами энергии, а последние определяются главным образом характером вихреобразования. Чем меньше образуется локальных завихрений, мешающих перетеканию воздуха под действием разности давлений, тем меньше будет и сила лобового сопротивления. В свою очередь, сопротивление трения обусловлено «прилипанием» к поверхности АТС слоев перемещающегося воздуха, вследствие чего воздушный поток теряет скорость. В этом случае величина сопротивления трения зависит от свойств материала, отделки поверхности автопоезда, а также от ее эксплуатационного состояния.

Существенным недостатком способа оценки аэродинамических потерь на основе эмпирических и полуэмпирических зависимостей является приближенный учет геометрических особенностей конструкции транспортного средства. Поэтому проведение исследований по оценке влияния заднего спойлера полуприцепа заданного конструктивного исполнения на аэродинамические характеристики автопоезда является весьма актуальной задачей в связи с широким использованием седельных автопоездов для скоростных перевозок грузов на дальние и сверхдальние расстояния по междугородним, международным и трансконтинентальным трассам [4].

Для исследования аэродинамики АТС проводят натурные испытания их образцов, испытания в аэродинамических трубах моделей АТС в уменьшенном масштабе и исследования на основе численного моделирования (виртуальные испытания).

Испытания моделей в аэродинамических трубах имеют ряд ограничений, связанных с выбором масштаба моделирования, который оказывает влияние на турбулентные эффекты. Испытания в аэродинамических трубах образцов в натуральную величину могут приводить к искаженной картине

обтекания по сравнению с движением автомобиля в неограниченном пространстве вследствие неизбежного влияния стенок канала трубы, а также возможного отсутствия движения дороги относительно автомобиля. Натурные испытания имеют ограничения, связанные с внешними условиями (окружающая среда, потери в трансмиссии, сопротивление качению). Виртуальные исследования с привлечением компьютерной техники позволяют не только обойтись без дорогостоящих испытаний в аэродинамических трубах, но и провести их в более сжатые сроки с возможностью изменения геометрии исследуемого объекта в ходе испытаний.

Результаты исследований [5–7] показывают, что применение возможностей современной вычислительной гидродинамики для решения задач внешнего обтекания АТС воздушной средой дает возможность построения относительно полной картины обтекания, исследования распределений скорости, давления по поверхности автопоезда, сил, действующих на отдельные элементы конструкции АТС.

Обтекание АТС воздушной средой во время его движения происходит в турбулентном режиме (число Рейнольдса $> 10^6$). В таком случае при решении практических задач моделирование процесса турбулентного обтекания производится с помощью решения системы уравнений Рейнольдса (RANS) и неразрывности, либо аналогичных по структуре уравнений, использующихся в методе крупных вихрей (LES) [8]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i' u_j'} \right],$$

где $u_i' u_j'$ — рейнольдсовы напряжения, которые замыкаются на основе гипотезы Буссинеска за счет введения параметра турбулентной вязкости ν_t [8].

В настоящее время ведущими специалистами в области турбулентности [8] для решения задач внешнего обтекания рекомендуется использовать в основном $k-\omega$ модели Саффмена-Вилкокса, модели Спаларта–Алмареса, модели переноса сдвиговых напряжений Ментера и $k-\epsilon$ модель Лондера и Джонса для кинетической энергии турбулентных пульсаций k и скорости ее диссипации ϵ .

Для проведения расчетных исследований в программном пакете UNIGRAPHICS построена 3D-модель исследуемого объекта — автопоезда со спойлером на полуприцепе (рисунок 3). Расчетная область представляет собой параллелепипед с размерами $72 \times 13 \times 10,5$ м. Внешние границы расчетной области выбраны относительно размеров внутри расположенного исследуемого объекта с точки зрения достаточности для реализации условий движения автопоезда в неограниченном пространстве (рисунок 4).

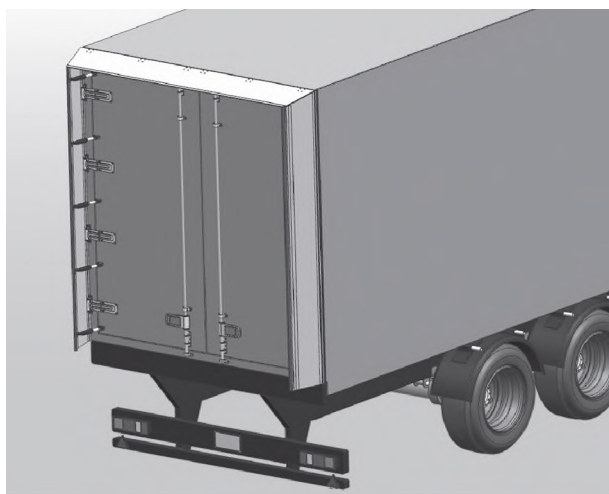


Рисунок 3 — 3D-модель заднего спойлера полуприцепа

С помощью лицензионной программы ANSYS Fluent построены расчетные сетки. Для повышения точности моделирования сетка на поверхности автопоезда выполнена более мелкой с использованием двух типов ячеек: квадратных и треугольных.

Для численного решения используется модель газовой динамики на основе уравнений Рейнольдса (RANS подход). В рассматриваемой постановке задачи искомыми функциями являются скорость обтекания воздушным потоком поверхности автопоезда и давление на ней. Для решения уравнений Рейнольдса выбрана модель турбулентности типа SST- $k-\omega$ модели Ментера [8].

Моделирование выполнено для случая движения автопоезда с постоянной скоростью ($U = 90$ км/ч или 25 м/с). Продольная составляющая скорости равнялась скорости набегающего потока (скорости движения автопоезда). В компьютерных моделях предполагалось, что обтекание происходит потоком воздуха при нормальном атмосферном давлении ($p_0 = 10^5$ Па) и постоянной температуре, равной 20 °С.

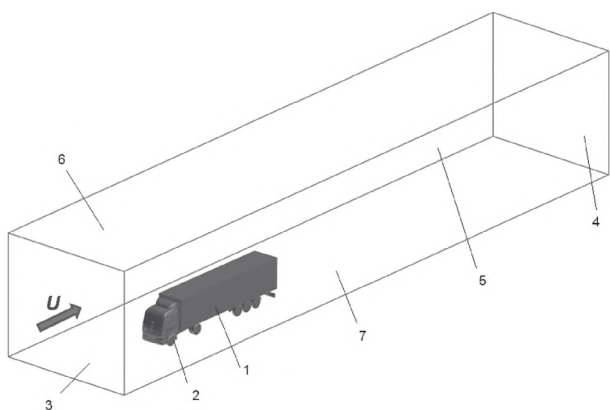


Рисунок 4 — Расчетная область с моделью автопоезда:

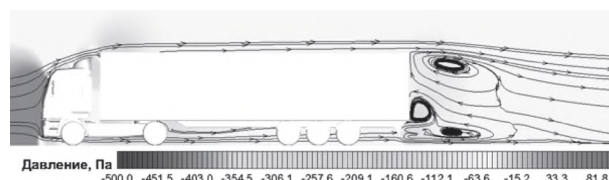
- 1 — поверхность автопоезда (условие стенки);
- 2 — поверхность колес (условие подвижной стенки (вращение));
- 3 — входная граница (скорость набегающего потока);
- 4 — выходная граница (мягкие граничные условия);
- 5 — боковая стенка (условие стенки);
- 6 — верхняя стенка (условие стенки);
- 7 — дорога (условие подвижной стенки);
- U — вектор скорости набегающего потока

На выходной границе расчетной области поставлены «мягкие» граничные условия на искомые функции (равенство нулю производных по продольной координате компонент скорости и давления). На боковых и верхней поверхностях расчетной области ставились условия стенки, но с нулевым трением (условие скольжения потока у стенки), что позволяло имитировать реальные условия неограниченной области в ограниченном пространстве расчетной области. Для поверхности автопоезда, дороги и колес ставились традиционные условия прилипания (отсутствие проскальзывания — No slip). Однако для поверхности дороги учитывалось, что она перемещается относительно автопоезда со скоростью набегающего потока в продольном направлении движения (навстречу автопоезду). Для колес задавалась угловая скорость вращения, рассчитанная через линейную скорость движения колеса, равную скорости набегающего потока.

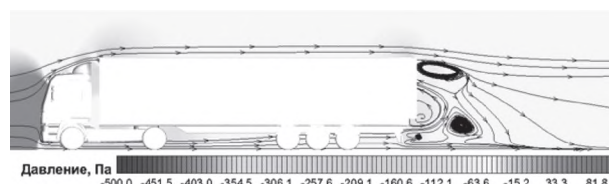
Следует отметить, что эффектом сжимаемости воздуха пренебрегаем. Такое предположение справедливо для рассматриваемого случая, поскольку скорость автопоезда (25 м/с) гораздо меньше, чем скорость, при которой существенно проявляются эффекты сжимаемости среды (число Маха должно быть больше 1/3, тогда как скорость звука в воздухе при заданных параметрах давления, температуры и плотности близка к 330 м/с).

На рисунке 5 приведены распределение давления и линии тока в срединной плоскости расчетной области около автопоезда.

Результаты моделирования показали (см. рисунок 5), что за кормой автопоезда существуют три вихревые структуры: одна — большая по размеру — размещается от половины высоты автопоезда и выше, другая — с противоположным направлением вращения воздуха — прижата к задней поверхности прицепа в районе номерного знака (зона донного давления), третья — в следе за автопоездом с направлением вращения в зависимости от наличия заднего спойлера прицепа. Установка заднего спойлера полуприцепа



а



б

Рисунок 5 — Распределение давления и линии тока в срединной плоскости для автопоезда без спойлера (а) и со спойлером (б)

па приводит к увеличению третьей вихревой структуры со сменой знака ее вращения, что позволяет уменьшить разряжение в зоне донного давления. Все эти факторы с различной степенью влияют на величину суммарного аэродинамического сопротивления движению автопоезда. При этом установка спойлера предложенной конструкции позволяет на 6,4 % снизить коэффициент аэродинамического сопротивления. В итоге это позволяет улучшить топливную экономичность автопоездов и повысить рентабельность магистральных перевозок грузов.

Заключение. Для автопоезда без заднего спойлера полуприцепа расчетная величина коэффициента полного аэродинамического сопротивления близка к 0,606. Установка заднего спойлера полуприцепа реорганизует вихревую структуру следа за автопоездом со значительным уменьшением области разрежения и приводит к снижению указанного сопротивления на 6,4 %, что подтверждает вывод о перспективности применения таких пассивных методов управления обтеканием автопоезда воздушной средой.

Список литературы

1. Евграфов, А.Н. Аэродинамика колесного транспорта / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий // Минск: НИРУП «Белавтотракторостроение», 2001. — 368 с.
2. Евграфов, А.Н. Аэродинамика магистральных автопоездов / А.Н. Евграфов, М.С. Высоцкий, А.И. Титович. — Минск: Наука и техника, 1988. — 232 с.
3. Wood, R. Simple and low-cost aerodynamic drag reduction devices for tractor-trailer trucks / R. Wood, S. Bauer. — SAE International, 2003. — 18 с.
4. Высоцкий, М.С. Основы проектирования модульных магистральных автопоездов / М.С. Высоцкий, С.И. Кочетов, С.В. Харитончик. — Минск: Беларус. навука, 2011. — 392 с.
5. Reducing Aerodynamic Drag // Lawrence Livermore National Laboratory [Electronic resource]. — 2014. — Mode of access: https://www.llnl.gov/str/May03/pdfs/05_03.4.pdf. — Date of access: 21.05.2014.
6. Aerodynamic Drag of Heavy Vehicles (class 7–8): Simulation and Benchmarking / R. McCallen [and et al.]. — Government / Industry Meeting Washington, 2000. — 19 p.
7. Обзор и эволюция методов исследований аэродинамических характеристик автомобилей КамАЗ / Д.Х. Валеев [и др.] // Инновации в машиностроении: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. ОИМ НАН Беларуси, Минск, 30–31 окт. 2008 г. / редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. — Минск, 2008. — 492 с.
8. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. — СПб: Балтийский ГТУ, 2001. — 108 с.

Andreichyk A.F., Ivchenko V.I., Karotki V.S., Pozhitok V.N., Kharytonchik S.V., Chorny A.D.
The influence of a rear deflector of a semitrailer on aerodynamics of an articulated truck

The paper discusses the process of computer modeling of the aerodynamic characteristics of the rear deflector of a semi-trailer. The basic types of aerodynamic testing of vehicles, as well as their advantages and disadvantages are separated. A comparative analysis efficiency of the rear spoiler of a semi-trailer is performed.

Keywords: aerodynamic resistance, truck, deflector, flow, streamline motion, modeling

Поступила в редакцию 20.02.2014.